

NOŚNOŚĆ FUNDAMENTU BEZPOŚREDNIEGO WEDŁUG EUROKODU 7

Według Eurokodu 7 opór graniczny podłoża gruntowego sprawdzamy w stanie granicznym GEO (pełna lista stanów granicznych: EQU, STR, GEO, UPL, HYD)

W stanie GEO należy sprawdzić, czy spełniona jest nierówność:

$$V_d \leq R_d$$

R_d - wartość obliczeniowa oporu przeciw oddziaływaniu (obliczeniowa wartość oporu granicznego podłoża gruntowego),

V_d - wartość obliczeniowa obciążenia (wartość obliczeniowa składowej pionowej obciążenia).

Nośność podłoża R_D możemy określić metodą analityczną, półempiryczną lub metodą wymagań przepisów wykorzystującą zalecane nośności podłoża.

W załączniku D normy PN-EN 1997 podany jest sposób obliczania oporu podłoża metodą analityczną: Norma wyróżnia dwa rodzaje warunków pracy fundamentu:

- bez odpływu;
- z odpływem.

W warunkach „**z odpływem**” zakłada się, że naprężenia w podłożu od konstrukcji nie powodują istotnego wzrostu ciśnienia porowego. Warunki takie występują przy powolnym wzroście naprężeń.

W warunkach „**bez odpływu**” przyjmuje się, że przyrost naprężeń w gruncie jest na tyle szybki, że powoduje wzrost ciśnienia wody w porach gruntu, a w konsekwencji redukcję wytrzymałości gruntu.

W przypadku sytuacji obliczeniowej trwałej należy rozpatrywać warunki „z odpływem”. W sytuacjach przejściowych, przy szybkim przyrastaniu naprężeń i w gruntach spoistych plastycznych należy uwzględnić również warunki „bez odpływu.

Jako miarodajne do oceny oporu granicznego podłoża w warunkach „z odpływem” wg EC7 należy przyjmować efektywne parametry wytrzymałościowe gruntu: ϕ' i c' .

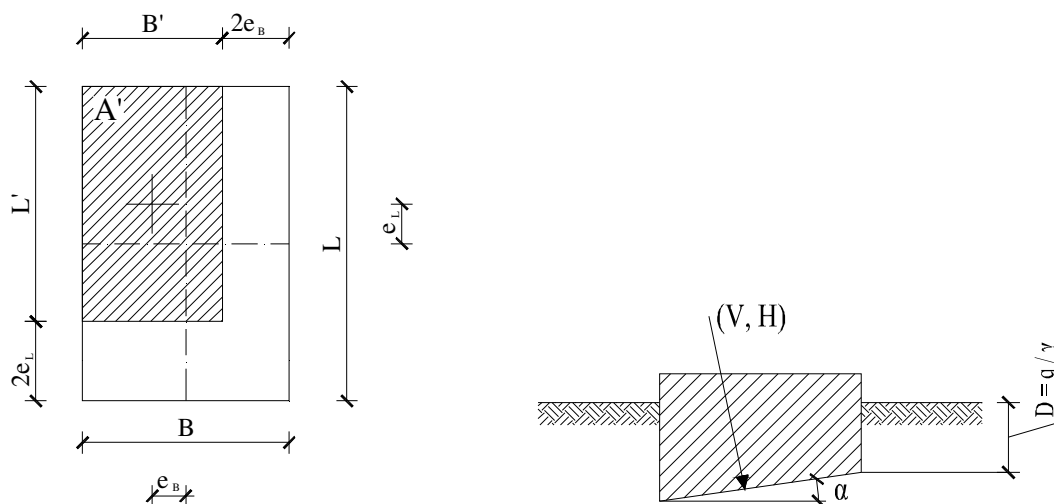
Jednostkowy opór graniczny podłoża dla warunków „**z odpływem**” wyznaczany jest w Eurokodzie w oparciu o poniższy wzór:

$$q_f^{EC7} = \frac{R}{A'} = c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q' \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,5 \cdot \gamma' \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma$$

R - oznacza nośność fundamentu, ustaloną w oparciu o obliczeniowe wartości parametrów geotechnicznych gruntu,

A' – zredukowana (efektywna) powierzchnia podstawy projektowanego fundamentu obliczona przy uwzględnieniu mimośrodków działania sił (wzory identyczne z podanymi w normie polskiej),

γ' - obliczeniowy efektywny ciężar objętościowy gruntu zalegającego poniżej podstawy fundamentu
 q' - obliczeniowy efektywny ciężar objętościowy gruntu zalegającego poniżej podstawy fundamentu
 c', ϕ' - efektywne parametry wytrzymałości gruntu na ścinanie, przyjmowane jako wartości obliczeniowe.



$A' = B' \cdot L'$ - obliczeniowe, efektywne pole powierzchni podstawy fundamentu,
 b_c, b_q, b_γ - wartości obliczeniowe współczynników nachylenia podstawy,
 B, L - szerokość, długość podstawy fundamentu,
 B', L' - efektywna szerokość, długość podstawy fundamentu,
 D - głębokość posadowienia,
 e_B, e_L - mimośrodowość siły wypadkowej,
 i_c, i_q, i_γ - współczynniki nachylenia obciążenia,
 N_c, N_q, N_γ - współczynniki nośności,
 q' - obliczeniowe, efektywne naprężenie od nakładu w poziomie podstawy fundamentu
 s_c, s_q, s_γ - współczynniki kształtu podstawy,
 γ' - obliczeniowy efektywny ciężar objętościowy gruntu poniżej poziomu posadowienia,

Bezwymiarowe współczynniki dla:

- nośności:

$$N_q = e^{\pi \cdot i_q \cdot \phi'} \cdot \text{tg}^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \text{ctg} \phi'$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \text{tg} \phi'$$

- nachylenia podstawy fundamentu:

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi')^2$$

$$b_c = b_q - (1 - b_q) / (N_c \cdot \operatorname{tg} \phi')$$

gdzie: α - kąt nachylenia podstawy fundamentu ukośnego;

- kształtu fundamentu:

$$s_q = 1 + \frac{B'}{L'} \cdot \sin \phi'$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 \cdot \frac{B'}{L'}$$

$$s_c = \frac{s_q \cdot N_q - 1}{N_q - 1}$$

- nachylenia obciążenia wywołanego obciążeniem poziomym H :

$$i_c = i_q - (1 - i_q) / (N_c \cdot \operatorname{tg} \phi')$$

$$i_q = [1 - H / (V + A' \cdot c' \cdot \operatorname{ctg} \phi')]^m$$

$$i_\gamma = [1 - H / (V + A' \cdot c' \cdot \operatorname{ctg} \phi')]^{m+1}$$

gdzie:

$$m = m_B = [2 + (B' / L')] / [1 + (B' / L')] - \text{gdy siła pozioma działa na kierunku B}$$

$$m = m_L = [2 + (L' / B')] / [1 + (L' / B')] - \text{gdy siła pozioma działa na kierunku L}$$

Gdy składowa pozioma obciążenia działa w kierunku tworzącym kąt θ z kierunkiem L' , wartość m można obliczyć ze wzoru:

$$m = m_\phi = m_L \cdot \cos^2 \phi + m_B \cdot \sin^2 \phi$$

Wartość obliczeniową parametru materiałowego obliczamy przez podzielenie wartości charakterystycznej przez wartość współczynnika materiałowego γ_M :

$$X_d = X_k / \gamma_M$$

Różnica w obliczaniu wartości obliczeniowej parametru gruntowego w stosunku do starej PN pojawia się przy wyznaczaniu wartości kąta tarcia wewnętrznego, w eurokodzie inaczej niż ma to miejsce w normie polskiej, współczynnik materiałowy nie odnosi się do wartości samego kąta ale jego tangensa.

Obciążenia działające na fundament mogą być stałe (Q) i zmienne (G). Ponadto mogą one wpływać niekorzystnie lub korzystnie na nośność fundamentu. Odpowiednie współczynniki częściowe znajdują się w tabelce poniżej.

Zakładając, że na fundament nie działają obciążenia korzystne, odpowiednie obciążenia obliczeniowe wyznaczamy w oparciu o wartości charakterystyczne pomnożone przez współczynniki obciążenia (zestaw A1), czyli:

obciążenie zmienne: $Q_d = \gamma_Q Q_k = 1.5 Q_k$

obciążenie stałe: $G_d = \gamma_G G_k = 1.35 G_k$

Porównanie współczynników częściowych dla sprawdzenia warunku nośności fundamentu bezpośredniego w stanie GEO:

Podejście obliczeniowe		DA1.1	DA1.2	DA2	DA3		PN
Współczynniki dla oddziaływań:	γ_F	A1	A2	A1	A1	A2	
Niekorzystne oddziaływania stałe	γ_G	1.35	1.00	1.35	1.35	1.00	1.10
Korzystne oddziaływania stałe		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90
Niekorzystne oddziaływania zmienne	γ_Q	1.50	1.30	1.50	1.50	1.30	1.30
Korzystne oddziaływania zmienne		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Współczynniki materiałowe:	γ_M	M1	M2	M1	M2		metoda B
ϕ'	γ_ϕ	1.00	1.25	1.00	1.25		1.11
c'	γ_c	1.00	1.25	1.00	1.25		1.11
c_u	γ_{cu}	1.00	1.40	1.00	1.40		1.11
q_u	γ_{qu}	1.00	1.40	1.00	1.40		1.11
γ	γ_γ	1.00	1.00	1.00	1.00		1.11
Współczynniki dla oporów:	γ_M	R1	R1	R2	R3		metoda B
opór graniczny podłoża	$\gamma_{R,v}$	1.00	1.00	1.40	1.00		1.23
poślizg	$\gamma_{R,h}$	1.00	1.00	1.10	1.00		1.39

2 poprawka do PN-EN 1997-1 ([PN-EN 1997-1:2008/Ap2:2010](#)), która ukazała się we wrześniu 2010 roku wprowadza Załącznik krajowy zawierający informacje dotyczące postanowień, które w EN 1997-1:2004 oraz EN 1997-1:2004/AC:2009 pozostawiono do ustalenia krajowego. Między innymi stanowi, że:

„Przy sprawdzaniu stanów granicznych nośności podłoża (GEO) należy stosować:

- przy sprawdzaniu stateczności ogólnej – podejście obliczeniowe 3,
- przy sprawdzaniu pozostałych stanów granicznych – podejście obliczeniowe 2.

W podejściu obliczeniowym 2. obliczenia należy wykonać przyjmując wszystkie wartości charakterystyczne, a współczynniki częściowe stosować przy sprawdzaniu warunku nośności, tj. opór graniczny podłoża należy wyznaczać z wzoru 2.7b, przyjmując wartość współczynnika obciążeń $\gamma_F = 1,0$ (podejście 2*)”.

Wspomniany wzór 2.7b przedstawiony jest w PN-EN 1997-1 jako:

$$R_d = R\{\gamma_F F_{rep}; X_k; a_d\} / \gamma_R$$

gdzie:

F_{rep} – wartość reprezentatywna oddziaływania;

γ_F – cząstkowy współczynnik dla oddziaływania;

X_k – wartość charakterystyczna właściwości materiału;

γ_M – cząstkowy współczynnik dla parametru geotechnicznego (współczynnik materiałowy), uwzględniający również niedokładności modelu;

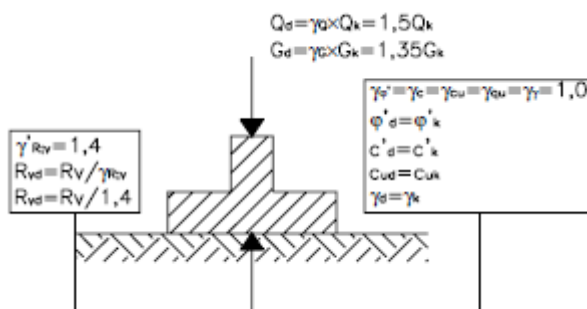
a_d – wartość projektowa danych geometrycznych;

γ_R – cząstkowy współczynnik dla nośności.

W **podejściu DA2** współczynniki częściowe γ są zasadniczo stosowane do oddziaływań i skutków oraz do oporów lub nośności, jako obliczeniowe przyjmujemy wartości charakterystyczne parametrów gruntowych.

Tablica NA.2 – Zestawienie wartości współczynników częściowych przy sprawdzaniu stanów granicznych nośności (GEO)

			stany graniczne nośności – podejście 2			stateczność ogólna – podejście 3		
			A ₁	M ₁	R ₂	A ₂	M ₂	R ₃
do oddziaływań	stałe	niekorzystne	1,35			1,0		
		korzystne	1,0			1,0		
	zmienne	niekorzystne	1,5			1,3		
do właściwości gruntu	tan φ			1,0		1,25		
	efektywna spójność			1,0		1,25		
	wytrzymałość bez odpływu			1,0		1,4		
	wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie			1,0		1,4		
	ciężar objętościowy			1,0		1,0		
fundamenty bezpośrednie	wyparcie				1,4			
	poślizg				1,1			
do oporu gruntu	pale	podstawa			1,1			
		pobocznicza			1,1			
		całkowity opór			1,1			
		wyciąganie			1,15			
	kotwy	tymczasowe			1,1			
		trwale			1,1			
	ściany oporowe	wyparcie			1,4			
		opór ze względu na poślizg			1,1			
		opór graniczny			1,4			
	skarpy	opór graniczny						1,0



I to tyle teorii!

Wracamy do projektu:

Na pojedynczą ławę fundamentową działa siła pionowa $V = G + Q$

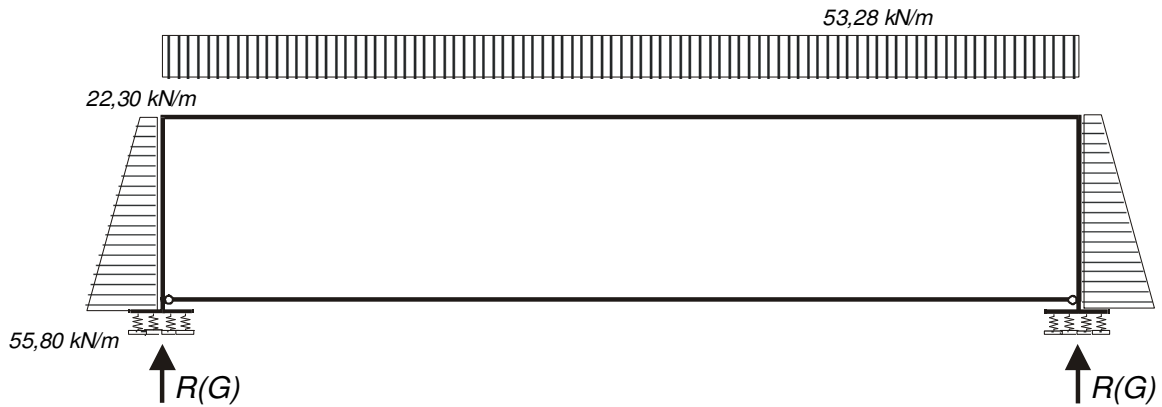
G – obciążenie stałe,

Q – obciążenie zmienne.

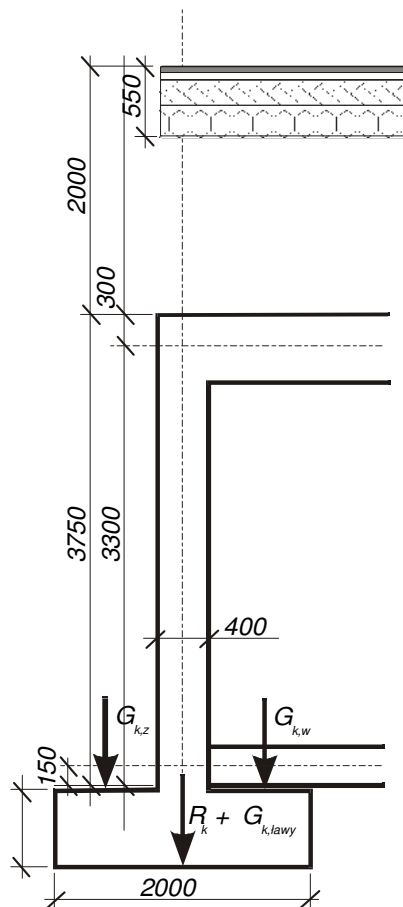
Aby otrzymać obciążenia G i Q działające na fundament musimy rozwiązać osobno dwa schematy statyczne:

1 – schemat z obciążeniami charakterystycznymi stałymi (otrzymujemy G_k),

2 – schemat z obciążeniami charakterystycznymi zmiennymi (otrzymujemy Q_k)



Reakcja od obciążeń stałych → $R(G) = 399,6 \text{ kN/m}$ (bez ciężaru własnego!)



$$R_k(G) = 399,6 + 26 \cdot 0,4 \cdot 3,75 = 399,6 + 39 = 438,6 \text{ kN/m}$$

Obciążenie pionowe na poziomie płyty stropowej:

$$g_k = 0,92 + 1,38 + 4,6 + 5,5 + 23,46 = 35,86 \text{ kN/m}^2$$

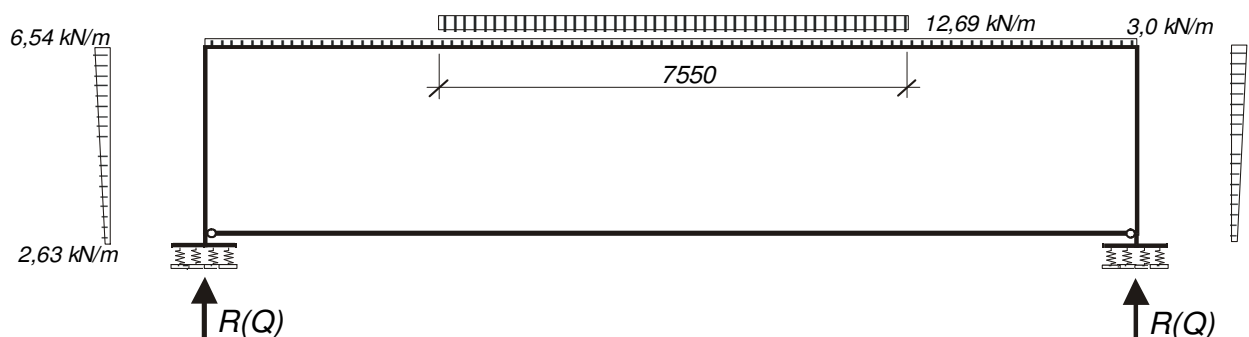
$$G_{k,z} = 16,5 \text{ kN/m}^3 \cdot 3,75 \cdot 0,80 + 35,86 \cdot 0,80 = 49,5 + 28,69 = 78,2 \text{ kN/m}$$

$$G_{k,w} = 25,0 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,35 \cdot 0,80 = 7,0 \text{ kN/m}$$

$$G_{k,lawy} = 26,0 \text{ kN/m}^3 \cdot 2,0 \cdot 0,60 = 31,2 \text{ kN/m}$$

$$G_k = 438,6 + 31,2 + 7,0 + 78,2 = 555 \text{ kN/m}$$

$$M_O = 78,2 \cdot 0,6 - 7,0 \cdot 0,6 = 42,72 \text{ kNm/m}$$



Reakcja od obciążeń zmiennych → $R(Q) = 70,4 \text{ kN/m} = Q_k$

$$V_k = G_k + Q_k = 555 + 70,4 = 625,4 \text{ kN/m}$$

$$e_B = M_0/V_k = 42,72/625,4 = 0,07 \text{ m}$$

Obciążenie obliczeniowe:

obciążenie zmienne: $Q_d = \gamma_Q Q_k = 1.5 Q_k = 1.5 \cdot 70,4 = 105,6 \text{ kN/m}$

obciążenie stałe: $G_d = \gamma_G G_k = 1.35 G_k = 1.35 \cdot 555,0 = 749,25 \text{ kN/m}$

$$V_d = G_d + Q_d = 749,25 + 105,6 = 854,85 \text{ kN/m}$$

W stanie GEO należy spełnić nierówność: $R_d \geq V_d = 854,85 \text{ kN/m}$

gdzie $R_d = R/\gamma_R = R/1.4$

$$R = A' \cdot q_f = A' \left[c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q' \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,5 \cdot \gamma' \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \right]$$

Parametry podłoża: $P_g, I_L = 0,22$

$$c_u^{(n)} = 30 \text{ kPa};$$

$$\phi_u^{(n)} = 18^\circ;$$

$$\gamma^{(n)} = 20,8 \text{ kN/m}^3;$$

Wymiary ławy fundamentowej: $B = 2,0 \text{ m}; L = 22,0 \text{ m}$

W celu obliczenia oporu podłoża w warunkach „z odplywem” potrzebujemy parametrów efektywnych c', ϕ' .

Dla porównania wzorów i procedur według obu norm założmy:

$$c_k' = c_u^{(n)} = 30 \text{ kPa},$$

$$\phi_k' = \phi_u^{(n)} = 18^\circ,$$

$$\gamma_k = \gamma^{(n)} = 20,8 \text{ kN/m}^3$$

Założenie taki powinno być bezpieczne dla obliczeń.

Wartości obliczeniowe parametrów gruntowych:

Podejście obliczeniowe DA2 narzuca współczynniki materiałowe $\gamma_M = 1$, w wyniku tego wartości charakterystyczne parametrów geotechnicznych przyjmujemy jako obliczeniowe.

Obliczeniowe, efektywne naprężenie od nakładu w poziomie podstawy fundamentu:

$$q' = \gamma \cdot D_{\min}$$

Minimalna głębokość posadowienia $D_{\min} = 1.0 \text{ m}$

$$q' = 20,8 \cdot 1.0 = 20,8 \text{ kPa}$$

Współczynniki nośności:

$$N_q = e^{\pi \cdot \tan \phi'} \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) = e^{\pi \cdot \tan(18^\circ)} \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45 + \frac{18}{2} \right) = 5,26$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \operatorname{ctg} \phi' = (5,26 - 1) \cdot \operatorname{ctg}(18^\circ) = 13,10$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \operatorname{tg} \phi' = 2 \cdot (5,26 - 1) \cdot \operatorname{tg}(18^\circ) = 2,77$$

Wymiary zredukowane fundamentu po uwzględnieniu mimośrodków:

$$B' = B - 2e_B$$

$$L' = L - 2e_L$$

$$e_B = 0,07 \text{ m}; \quad e_L = 0,00 \text{ m};$$

$$B' = 2 - 2 \cdot 0,07 = 1,86 \text{ m}$$

$$L' = 22 - 2 \cdot 0,00 = 22,0 \text{ m}$$

Współczynniki uwzględniające wpływ przechylenia podstawy fundamentu przyjęto równe jedności ($\alpha = 0$).

$$b_q = b_c = b_\gamma = 1$$

Współczynniki kształtu obliczone jak dla fundamentu prostokątnego:

$$s_q = 1 + \frac{B'}{L'} \cdot \sin \phi' = 1,03$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 \cdot \frac{B'}{L'} = 0,97$$

$$s_c = \frac{s_q \cdot N_q - 1}{N_q - 1} = 1,03$$

Współczynniki nachylenia obciążenia:

$$m = m_B = [2 + (B' / L')] / [1 + (B' / L')] = [2 + (1,86 / 22,0)] / [1 + (1,86 / 22,0)] = 1,92$$

Ponieważ składowa pozioma obciążenia $H = 0 \rightarrow i_c = i_q = i_\gamma = 1,0$

Obliczenie jednostkowego oporu granicznego:

$$\frac{R}{A'} = [30 \cdot 13,10 \cdot 1,0 \cdot 1,03 \cdot 1,0 + 20,8 \cdot 5,26 \cdot 1,0 \cdot 1,03 \cdot 1,0 + 0,5 \cdot 20,8 \cdot 1,86 \cdot 2,77 \cdot 1,0 \cdot 0,97 \cdot 1,0] = 570,3 \text{ kPa}$$

Obciążenia zbierane są z 1 m długości ściany, więc opór również wyrażamy na 1 m długości ławy:

$$R = q \cdot B' \cdot 1,0 = 570,3 \cdot 1,86 \cdot 1,0 = 1062,7 \text{ kN/m}$$

Sprawdzenie warunku nośności:

$$R_d = R / \gamma_R = R / 1,4 = 1062,7 / 1,4 = 759,1 \text{ kN/m} < V_d = 854,85 \text{ kN/m}$$

Warunek znów niespełniony => należy zwiększyć wymiar fundamentu.

Warunek zostanie spełniony po zwiększeniu szerokości ławy do $B = 2,25 \text{ m}$